

전력계통 과도상태에서의 STATCOM에 의한 제동력 평가

박 지 호
경북대학교

The Evaluation of Damping by STATCOM in Power System Transient State

Ji-Ho Park
Kyungpook National University

Abstract - 본 논문은 전력계통의 과도상태에서의 STATCOM에 의해 제공되는 제동력을 평가한다. 기존의 논문들은 FACTS장비가 시스템의 안정도에 영향을 주는 제동력을 주로 고유치해석을 통하여 평가하였지만 본 논문은 에너지함수를 이용하여 FACTS장비에 의한 추가적인 제동력을 평가한다. 동기발전기의 상세모델링을 사용한 에너지함수를 통하여 STATCOM의 제동력이 전력계통의 과도 안정도에 미치는 영향을 시뮬레이션한다. 1기무한대모선 시스템에 적용한 결과를 보인다.

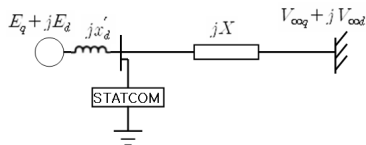
1. 서 론

전력전자공학의 급격한 발전은 전력계통의 새로운 장치를 개발하는데 큰 공헌을 하였다. 전력전자기술로 개발된 FACTS장비들은 전력조류를 제어하기 위해 효과적으로 사용되고 있다. 이들 중 SVC, TCSC, TCPST는 각각 리액터, 커패시터 그리고 변압기탭을 제어하기 위해 싸이리스터를 사용한다. 이들은 전압, 임피던스 그리고 위상각 하나만을 제어하여 전송선로의 전력을 제어한다. 반면 UPFC는 직렬전압원과 병렬전압원 두개를 이용하여 전압, 위상각, 임피던스 3가지 모두를 제어하여 전력조류를 제어한다. STATCOM은 기존의 SVC를 대체하는 무효전력소자로서 병렬전압원 하나만을 가지는 장비이다. FACTS장비들의 주요 사용 목적은 모선전압을 유지시켜주는 것이지만 전력계통의 과도상태에서 발전기의 제동력을 추가시켜 과도안정도를 증진시킬 수 있다. 기존의 대부분의 논문들을 FACTS장비들의 과도안정도에 미치는 영향을 고유치해석을 통하여 분석하였다. 하지만 본 논문은 과도에너지함수를 이용하여 STATCOM 전력계통의 과도상태에 미치는 영향을 해석한다. 과도에너지함수를 이용한 안정도 직접해석법은 전력계통의 고장상태와 사고후 상태에서 전력계통의 운동에너지와 위치에너지를 계산하여 사고중과 후의 에너지 변화를 통하여 안전도를 판정하는 방법이다. 사고중에 전력계통이 얻은 운동에너지를 전력계통이 흡수하여 위치에너지로 전부 변환할 수 있다면 시스템은 안정하고 변환할 수 없다면 시스템의 안정도는 붕괴된다. 같은 사고에 대해서 발전기의 제동력이 충분하면 시스템은 안정할 수 있고 제동력이 부족하면 시스템이 불안정하게 된다. 따라서 시스템의 안정도를 증진시키기 위해서는 과도에너지를 효과적으로 소멸시키기 위한 제동력의 증가가 필요하다. 전력계통에 STATCOM을 설치하면 과도상태에서 발전기의 제동력을 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 동기발전기의 상세모델링의 에너지함수를 이용하여 STATCOM의 제동력을 평가한다.

2. 본 론

2.1 STATCOM이 설치된 1기무한대 모선

그림1은 STATCOM이 설치된 1기무한대모선 계통이다. 발전기는 이 축모델로 나타냈고 선로와 발전기내부의 저항은 무시했다.



〈그림 1〉 1기무한대모선

$$E_q + jE_d = E' \angle \theta \quad (1)$$

$$V_{\infty q} + jV_{\infty d} = V_{\infty} \angle -\delta \quad (2)$$

식(2)에서 위상각 δ 는 무한대모선의 전압 $V_{\infty} \angle 0^\circ$ 을 발전기의 q축기준의 변환하는데 필요한 위상각이다. 그림1에서 STATCOM은 전류원 I_s 으로 모델링 할 수 있다[1]. 이때 STATCOM이 설치된 모선의 전압 $V \angle \beta$ 은 다음의 식으로 표현된다.

$$V \angle \beta = \frac{XE_q' + x_d' V_{\infty q}}{x_d' + X} + j \frac{XE_d' + x_d' V_{\infty d} + Xx_d' I_s}{x_d' + X} \quad (3)$$

발전기가 공급하는 유효전력은

$$P_e = \frac{E_q V_{\infty} \sin(\delta) + E_d V_{\infty} \cos(\delta)}{x_d' + X} + \frac{E' X}{x_d' + X} I_s \sin(\theta - \beta) \quad (4)$$

식(4)에서 유효전력에 STATCOM 전류 I_s 에 의한 항이 추가됨을 알 수 있다. $I_s = 0$ 이면 기존의 전력식과 일치한다.

2.2 과도에너지함수

동기발전기의 동요방정식은

$$\frac{2H}{\omega_R} \frac{d\omega}{dt} = f = P_{m0} - P_e - D\omega \quad (5)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (6)$$

과도에너지함수는

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} \frac{2H}{\omega_R} \omega^2 - \int_{\delta_s}^{\delta} f d\delta = V_{KE} + V_{PE} \quad (7)$$

식(7)에서 V_{KE} 는 운동에너지 그리고 V_{PE} 는 위치에너지를 나타낸다. 전력계통에 사고가 발생하면 V_{KE} 는 증가하고 사고가 제거되면 V_{KE} 는 V_{PE} 으로 전환되는데 운동에너지가 전부 위치에너지로 전환되지 못하면 시스템은 불안정하게 된다. 발전기의 제동력이 충분하면 에너지함수의 크기 V 는 작게되고 시스템의 안정도 한계는 더욱 커진다. 따라서 임계 고장제거시간도 커지게 된다. 전력계통에 STATCOM을 설치하면 식(4)처럼 발전기에 추가적인 제동력이 제공되어 과도상태에서 발전기의 제동력은 증가되어 STATCOM이 안정도 증진에 기여하게 된다.

2.3 STATCOM에 의한 제동력

식(7)을 미분하면

$$\dot{V}(\theta, \omega) = \frac{\partial V}{\partial \delta} \dot{\delta} + \frac{\partial V}{\partial \omega} \dot{\omega} = -\omega \frac{E' X}{x_d' + X} I_s \sin(\theta - \beta) - D\omega^2 \quad (8)$$

식(8)에서 $I_s \neq 0$ 이면 STATCOM에 의한 추가적인 제동력이 제공됨을 알 수 있다. 반부적성(semi-negativeness)을 만족하기 위해서 I_s 는 양의 값을 가져야한다. 본 논문에서는 $I_s = D_s \sin(\theta - \beta)$ 로 두고 모의실험했다. D_s 는 STATCOM의 정격범위내에서 결정된다. D_s 의 값이 클수록 식(8)의 절대치는 커지고 시스템의 제동력도 커지게 된다. D_s 의 변화에 대한 제동력의 변화를 모의한다.

2.4 시뮬레이션방법

$$\dot{E}_q' = \frac{1}{T_{d0}'} (E_{FD} - E) \quad (9)$$

$$\dot{E}_d' = \frac{1}{1 + sT_{d0}'} (x_q - x_q') \quad (10)$$

$$V_d = -rI_d - x_q' I_q + E_d' \quad (11)$$

$$V_q = -rI_q + x_d' I_d + E_q' \quad (12)$$

그림1의 발전기 모선에 3상사고를 가정하고 일정시간 뒤에 고장을 제거시킨다. 선로의 저항은 무시하고, 사고전후의 선로의 임피던스의 변화는 없고 사고중에만 임피던스가 변한다고 가정한다. 식(9)-(12)로 어지는 발전기 이축모델의 식을 수치적분을 이용하여 푼다. 다음 식(5)(6)(7)을 이용하여 과도에너지를 계산한다. I_s

의 변화에 따른 제동력의 변화를 수치적으로 시뮬레이션하게 된다. 발전기 정수는 $H=2.37, X_d=1.7, X'_d=0.245, X_q=1.64, X'_q=0.38, T_{d0}=5.9, T_{q0}=0.075, r=0$ 이고 선로는 $X=0.4$ 이다. 발전기모선에서 사고를 가정할 때 사고중 전류는

$$I_d = \frac{V_{\infty q} - E_q}{x_d} \quad (13)$$

$$I_q = \frac{-(V_{\infty d} - E_d)}{x_d} \quad (14)$$

사고후 0.15초후에 사고가 자동소멸된다고 가정하면 전류는

$$I_d = \frac{V_{\infty q} - E_q}{x_d + X} \quad (15)$$

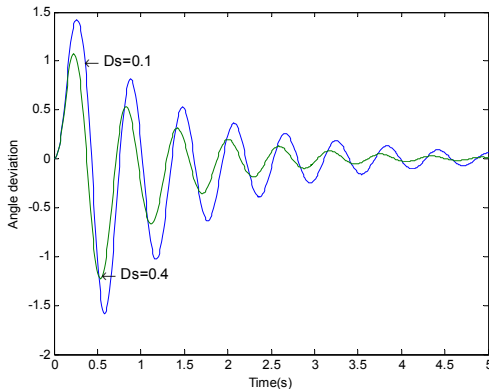
$$I_q = \frac{-(V_{\infty d} - E_d)}{x_d + X} \quad (16)$$

식(4)의 첫항은 $P_e = E_d I_d + E_q I_q$ 와 같으므로 사고중과 사고후의 P_e 는 발전기방정식의 수치해인 E_d, E_q 와 식(13)-(16)을 이용하여 발전기의 과도상태를 모의할 수 있다. 발전기의 과도에너지는 사고중과 후의 위상각 변화에 대하여 다음식으로 계산한다. f^P 는 사고후 시스템을 의미한다.

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} \frac{2H}{\omega_R} \omega^2 - \int_{\delta_s}^{\delta} f^P d\delta \quad (17)$$

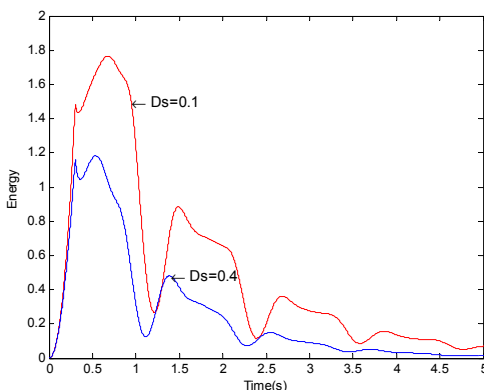
2.5 시뮬레이션 결과

그림2는 D_s 값의 변화에 따른 발전기 위상각변위를 나타낸 것이다. D_s 값이 증가하면 발전기에 대한 제동력도 증가하여 더 빠르게 위상각의 변화가 0으로 수렴함을 알 수 있다. 즉 STATCOM의 존재는 전력계통의 과도상태에 추가적인 제동력을 제공하여 전력계통의 안정도에 기여함을 알 수 있다.



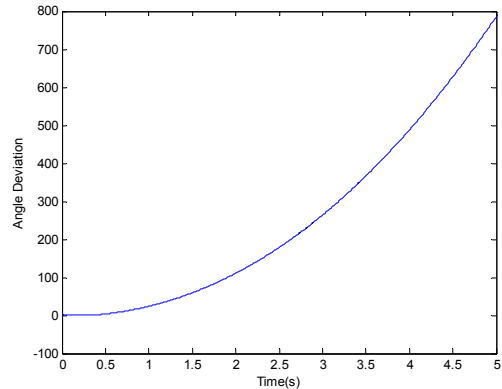
〈그림 2〉 발전기 위상각 변화

그림3은 D_s 값의 변화에 따른 과도에너지의 변화를 나타낸 것이다. D_s 값이 증가하면 과도에너지도 더 빠른 속도로 0으로 수렴함을 확인할 수 있다. 즉 STATCOM에 의해 발전기에 추가적인 제동력이 제공됨을 알 수 있다.



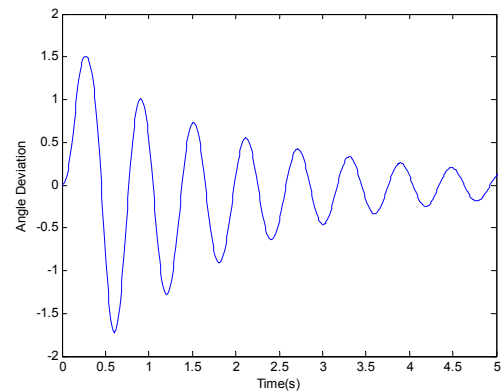
〈그림 3〉 발전기 과도에너지변화

그림4는 같은 고장시간에 대하여 D 와 D_s 의 값을 모두 0으로 설정한 경우의 응답곡선이다. 발전기의 제동상수를 모두 0으로 설정했을 때 발전기가 불안정함을 알 수 있다.



〈그림 4〉 발전기가 불안정한 경우

그림5는 $D=0, D_s=0.1$ 일때의 응답곡선이다. 그림4와 비교하면 STATCOM만의 제동력으로 발전기가 안정함을 알 수 있다. 따라서 STATCOM이 제공하는 추가적인 제동력으로 인하여 발전기의 임계고장제거시간을 증가시킬 수 있다.



〈그림 5〉 $D_s=0.1$ 인 경우의 응답곡선

3. 결 론

본 논문의 STATCOM의 제동력을 평가하기 위하여 발전기의 과도에너지 함수를 이용하여 시뮬레이션했다. 발전기의 사고후 기간동안에 STATCOM의 존재로 인하여 과도상태에서 발전기의 과도에너지가 줄어든다는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 STATCOM이 존재하지 않을 때 발전기가 불안정해질 수 있는 경우도 추가적인 제동력에 의해 발전기가 안정할 수 있다는 것을 보여준다. 즉 추가적인 제동력에 의한 발전기 임계고장제거시간을 크게 할 수 있다. 본 논문은 STATCOM이 발전기 안정도에 미치는 영향을 기존의 고유치해석법을 사용하지 않고 에너지함수를 이용하여 시뮬레이션하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. H. Song, A.T. Johns "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", IEE, 1999
- [2] M.A.Pai, "Energy Function Analysis for Power System Stability", Kluwer Academic Publishers, 1989
- [3] P.W.Sauer, M.A.Pai, "Power System Dynamics and Stability", Prentice Hall, 1998
- [4] P.M. Anderson and A.A. Fouad; Power System Control and Stability, Iowa State University Press, 1977. pp. 327-333
- [5] K.R. Padiyar, R.K. Varma, "Damping Torque Analysis of Static Var System Controllers", IEEE Trans. PS 6 (2) 1991